

## 基于 DSP 和新型滑模控制的 DSTATCOM 研究

张伟奎<sup>1</sup>, 常鲜戎<sup>2</sup>, 李涛<sup>3</sup>, 王辉云<sup>4</sup>, 马瑞军<sup>5</sup>

(1. 新疆电力公司乌鲁木齐电业局, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 河北 保定 071003; 3. 济宁市供电公司, 山东 济宁 272000; 4. 济南市供电公司, 山东 济南 250012; 5. 新疆工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830023)

**摘要:** 为提高配电网静止同步补偿器(Distribution Static Synchronous Compensator, DSTATCOM)控制系统的鲁棒性和动态性能, 在对DSTATCOM非线性数学模型时域分析的基础上, 得出滑模控制的一般规律。为削弱滑模控制的抖振现象, 提出一种新型滑模控制方法。该方法将滑模面分解为两个滑模子面, 根据滑模子面的偏离程度分别采用不同的滑模控制规律, 既保证了电流跟踪的快速性又削弱了抖振现象。研制了一台基于DSP的DSTATCOM样机, 给出硬件原理和软件设计流程。实验结果表明, 该控制方法动态响应快、鲁棒性好、能较好地抑制电流的毛刺现象, 证明了该方法的正确性和可行性。

**关键词:** 配电网静止同步补偿器; 谐波抑制; 无功补偿; 滑模控制; 鲁棒性

### Research on DSTATCOM based on DSP and novel sliding mode control

ZHANG Wei-kui<sup>1</sup>, CHANG Xian-rong<sup>2</sup>, LI Tao<sup>3</sup>, WANG Hui-yun<sup>4</sup>, MA Rui-jun<sup>5</sup>

(1. Urumqi Electric Power Bureau, Xinjiang Electric Power Corporation, Urumqi 830011, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 3. Jining Electric Power Company, Jining 272000, China; 4. Jinan Electric Power Company, Jinan 250012, China; 5. Xinjiang College of Engineering, Urumqi 830023, China)

**Abstract:** In order to improve the robustness and dynamic response of distribution static synchronous compensator (DSTATCOM) control system, the common sliding mode control strategy is proposed based on the time-domain analysis of DSTATCOM nonlinear mathematical model. A novel sliding mode control strategy is proposed to further reduce chattering. Sliding surface is separated into two different sliding surface according to deviation extent which has different sliding mode strategy, so the current tracking speed is improved and chattering is reduced. Hardware and software of DSTATCOM are designed, and a prototype based on DSP is implemented. The proposed control strategy possesses the advantages such as strong robusticity, good dynamic response and low chattering, which show its validity and feasibility.

**Key words:** DSTATCOM; harmonic suppression; reactive power compensation; sliding mode control; robustness

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)13-0007-06

## 0 引言

随着电力电子技术的飞速发展, 配电网中整流器、变频器等非线性负荷不断增加, 由此带来的谐波污染日益严重; 同时, 大量电弧炉、异步电动机等感性负载消耗大量无功功率, 如果不能及时补偿, 将造成电压的降低和波动。谐波污染和功率因数的降低严重恶化了供电质量<sup>[1-4]</sup>, 对配电网的安全和经济运行造成了不利影响。配电网静止同步补偿器(Distribution Static Synchronous Compensator, DSTATCOM)是一种可以同时抑制谐波、动态补偿无功的新型电力电子装置, 具有响应速度快, 损耗

低, 可动态连续调节, 运行范围宽等优点, 成为现阶段电能质量控制领域内的研究热点<sup>[5-8]</sup>。

DSTATCOM 的补偿性能很大程度上取决于其控制方法的优劣。滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是一种非线性控制方法, 具有响应速度快, 对系统变化和外部干扰不敏感, 鲁棒性好的优点<sup>[9-12]</sup>。它同时是一种开关控制, 要求快速、频繁地对系统的状态进行切换, 而 DSTATCOM 主电路中电力电子开关器件的工作模式也是开关模式, 因此, 可将滑模控制应用于 DSTATCOM, 提高系统的动态响应和抗干扰性。

实际应用中的滑模控制并非理想控制, 开关控

制过程中的时间延迟和空间滞后会导致滑动模态呈抖动形式，即抖振，具体表现为电流的纹波较大，产生“毛刺”现象，这一问题是其应用的突出障碍<sup>[13-14]</sup>。本文在对三相四线型 DSTATCOM 非线性数学模型时域分析的基础上得到滑模控制的一般规律，进一步提出一种新型滑模控制方法，基于该方法研制了一台基于 DSP 的 DSTATCOM 样机，给出其硬件原理和软件设计流程，实验结果证明了该方案的正确性和可行性。

## 1 DSTATCOM 数学模型

三相四线型 DSTATCOM 的主电路结构如图 1 所示。忽略系统的等效电阻， $e_a$ 、 $e_b$ 、 $e_c$  为系统三相电压， $i_{sa}$ 、 $i_{sb}$ 、 $i_{sc}$ 、 $i_{sn}$  为三相电网电流和中线电流， $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$ 、 $i_{Ln}$  为三相负荷电流和中线电流， $i_{ca}$ 、 $i_{cb}$ 、 $i_{cc}$ 、 $i_{cn}$  为 DSTATCOM 的输出电流，其包含了负荷电流的谐波和无功分量， $u_{dc}$  表示直流电容电压， $L$  为滤波电感。

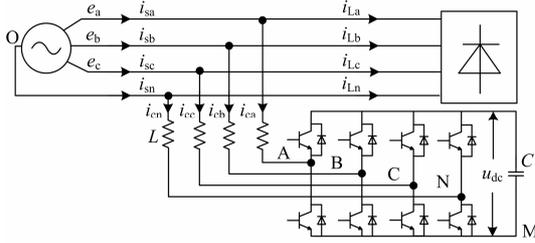


图 1 三相四线型 DSTATCOM 主电路结构图

Fig. 1 Main circuit of three-phase four-wire DSTATCOM

使用开关函数法对 DSTATCOM 进行建模，得开关函数为

$$h_k = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂导通、下桥臂关断} \\ 0, & \text{下桥臂导通、上桥臂关断} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中， $k=a, b, c, n$ ，分别代表 a 相、b 相、c 相和中线，进一步列写电路方程如式(2)。

$$\begin{bmatrix} L di_{ca}/dt \\ L di_{cb}/dt \\ L di_{cc}/dt \\ L di_{cn}/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ 0 \end{bmatrix} - u_{dc} \begin{bmatrix} h_a \\ h_b \\ h_c \\ h_n \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{MO} \\ u_{MO} \\ u_{MO} \\ u_{MO} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由基尔霍夫电压定律和电流定律得

$$\begin{cases} e_a + e_b + e_c = 0 \\ i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} + i_{cn} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

联立式(2)和式(3)得

$$u_{MO} = -\frac{u_{dc}}{4} \sum_{k=a,b,c,n} h_k \quad (4)$$

对式(2)进行改写为

$$\begin{bmatrix} L di_{ca}/dt \\ L di_{cb}/dt \\ L di_{cc}/dt \\ L di_{cn}/dt \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \\ 0 \end{bmatrix} - u_{dc} \begin{bmatrix} m_a \\ m_b \\ m_c \\ m_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， $m_k = h_k - \sum_{k=a,b,c,n} \frac{h_k}{4}$  为各桥臂控制信号。

## 2 DSTATCOM 滑模控制器的设计

### 2.1 DSTATCOM 滑模控制的一般控制规律

根据滑模控制理论，首先定义切换面。由于 DSTATCOM 的工作模式是控制输出电流跟踪谐波和无功的指令电流，所以定义以下切换面：

$$\begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \\ s_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca}^* - i_{ca} \\ i_{cb}^* - i_{cb} \\ i_{cc}^* - i_{cc} \\ i_{cn}^* - i_{cn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式(6)中， $i_{ca}^*$ 、 $i_{cb}^*$ 、 $i_{cc}^*$ 、 $i_{cn}^*$  为指令电流，对于三相四线型 DSTATCOM，其滑模面只有 3 个滑模子面是独立的，根据滑模运动的可达性条件有

$$\begin{cases} s_a \frac{ds_a}{dt} = s_a \left[ \frac{di_{ca}^*}{dt} - \frac{e_a}{L} + \frac{u_{dc}}{L} m_a \right] < 0 \\ s_b \frac{ds_b}{dt} = s_b \left[ \frac{di_{cb}^*}{dt} - \frac{e_b}{L} + \frac{u_{dc}}{L} m_b \right] < 0 \\ s_c \frac{ds_c}{dt} = s_c \left[ \frac{di_{cc}^*}{dt} - \frac{e_c}{L} + \frac{u_{dc}}{L} m_c \right] < 0 \end{cases} \quad (7)$$

根据滑模控制的定义，得 DSTATCOM 滑模控制的一般控制规律为

$$\begin{cases} m_a = -k_a \text{sign}(s_a) \\ m_b = -k_b \text{sign}(s_b) \\ m_c = -k_c \text{sign}(s_c) \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中， $\text{sign}$  是符号函数，进一步推导得到 DSTATCOM 电流完全可控的条件为

$$\begin{cases} k_a > |L di_{ca}^*/dt - e_a|/u_{dc} \\ k_b > |L di_{cb}^*/dt - e_b|/u_{dc} \\ k_c > |L di_{cc}^*/dt - e_c|/u_{dc} \end{cases} \quad (9)$$

通过式(8)、式(9)便可以控制 DSTATCOM 的开关器件，达到滑模控制的目的。设计滑模控制的一般控制规律如表 1 所示，表中“+，-”代表对项的正负符号。

表 1 滑模控制的一般控制规律

Table 1 Common strategy of sliding mode control

状态编号	$s_a$	$s_b$	$s_c$	$s_n$	$m_a$	$m_b$	$m_c$	$m_n$	开关模式
1	+	-	-	-	-	+	+	+	(0,1,1,1)
2	+	-	-	+	-	+	+	-	(0,1,1,0)
3	+	-	+	-	-	+	-	+	(0,1,0,1)
4	+	-	+	+	-	+	-	-	(0,1,0,0)
5	+	+	-	-	-	-	+	+	(0,0,1,1)
6	+	+	-	+	-	-	+	-	(0,0,1,0)
7	+	+	+	-	-	-	-	+	(0,0,0,1)
8	-	-	-	+	+	+	+	-	(1,1,1,0)
9	-	-	+	-	+	+	-	+	(1,1,0,1)
10	-	-	+	+	+	+	-	-	(1,1,0,0)
11	-	+	-	-	+	-	+	+	(1,0,1,1)
12	-	+	-	+	+	-	+	-	(1,0,1,0)
13	-	+	+	-	+	-	-	+	(1,0,0,1)
14	-	+	+	+	+	-	-	-	(1,0,0,0)

### 2.2 DSTATCOM 的新型滑模控制方法

由滑模控制理论可知, 当控制切换系统具有理想开关特性时, 其在切换面上的滑动模态是降维光滑运动, 且逐渐趋向原点。根据滑模控制的一般规律, DSTATCOM 可在有限时间内进入切换面, 但是实际开关器件存在延迟与滞后, 导致不存在光滑的降维运动, 使得系统在切换面上的运动呈抖动形式, 即抖振。具体表现为输出电流纹波较大, 特别是在负载电流变化较大的情况下, 会导致“毛刺”现象的产生。抖振问题是滑模控制应用的突出障碍, 通常情况下, 采用趋近律滑模控制是一种减小抖振的方法, 一般趋近律的表达形式为

$$\dot{s} = -\varepsilon \text{sign}(s) - f(s) \quad (10)$$

式(10)中,  $\varepsilon > 0$ ,  $f(0)=0$ , 且当  $s \neq 0$  时, 有  $sf(s) > 0$ 。DSTATCOM 的指令电流随着负荷中谐波和无功分量的动态变化而变化, 具有很强的不确定性。采用一般趋近律进行控制时能减少切换面上的抖振现象, 但抖振的衰减过程可能需要多个控制周期的反馈控制, 导致不能快速减小电流跟踪误差进而影响补偿效果。为保证系统进入切换面的快速性, 同时提高系统在滑模面上运动的稳定性, 减少抖振现象, 提出一种具有饱和特性的新型滑模控制律为

$$\dot{s}_x = \begin{cases} k_1 m_x & |s_x| > \Delta \\ -\delta \text{sign}(s_x) - k_2 s_x & |s_x| \leq \Delta \end{cases} \quad (11)$$

式(11)中:  $k_1 > 0$ ;  $k_2 > 0$ ;  $\delta > 0$ ;  $x \in \{a, b, c, n\}$ ;  $\Delta = \max\{|s_a|, |s_b|, |s_c|, |s_n|\}$ 。

新型滑模控制律将滑模面分解为两个滑模子面 ( $s = \Delta, s = -\Delta$ ), 根据滑模子面的偏离程度采用不同的控制规律。在  $\pm\Delta$  “边界层”外, 滑模子面偏离较

大, 采用一般的滑模控制规律, 使电流的偏差在较短时间内得到衰减, 提高了系统进入切换面的快速性; 在  $\pm\Delta$  “边界层”内, 滑模子面偏离较小, 采用线性趋近律滑模控制, 使电流偏差在衰减的同时不会形成较大抖振, 提高了切换的稳定性。因而, 新型滑模控制规律既保证了电流跟踪的快速性又削弱了抖振现象, 提高了滑模运动的稳定性。

## 3 基于 DSP 的 DSTATCOM 设计

### 3.1 DSTATCOM 参数

根据 DSTATCOM 工作原理, 设计 DSTATCOM 硬件框图, 如图 2 所示。

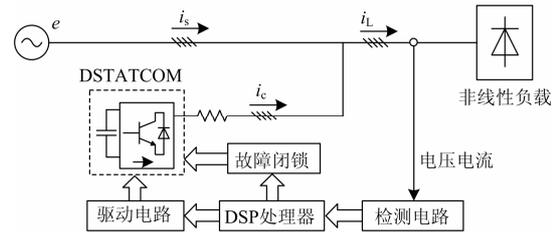


图 2 DSTATCOM 硬件框图

Fig. 2 Hardware block diagram of DSTATCOM

检测电路对进入 DSP 处理器的电压和电流进行采样和滤波; DSP 处理器用于实现指令电流的检测和滑模控制的计算, 型号为 TMS320F2812, 主频最高可达 150 MHz, 具有功能强大的外设, 非常适合用于数字控制; 驱动电路用于接收 DSP 发出的驱动信号, 将其转换为适合开关器件电平要求的驱动脉冲; 当 DSTATCOM 发生短路或者过压时, 故障闭锁部分闭锁开关元件, 切断 DSTATCOM 与电网的电气连接, 保证设备的安全; 主电路中开关器件采用绝缘栅双极晶体管(IGBT), 型号为 BSMGB100GB120DN2, 其额定电流 150 A, 耐压 1200 V, 此外, 实际工作时 IGBT 存在一定的导通和关断时间, 为防止直流母线电压直通导致 IGBT 损坏, 通常对上下桥臂 IGBT 的通断时刻设置死区时间<sup>[15-16]</sup>。DSTATCOM 的工作参数如表 2 所示。

表 2 DSTATCOM 工作参数

Table 2 Working parameters of DSTATCOM

工作参数	数值	说明
$e/V$	220	三相电网电压有效值
$f/Hz$	50	电网频率
$S/kVA$	10	DSTATCOM 容量
$u_{dc}/V$	750	DSTATCOM 直流侧电压
$C/\mu F$	5 000	DSTATCOM 直流侧电容
$L/mH$	5	DSTATCOM 滤波器电感
$f_s/kHz$	12.8	A/D 采样频率
$t/\mu s$	5	死区时间

### 3.2 DSTATCOM 软件流程

DSTATCOM 软件处理流程如图 3 所示。

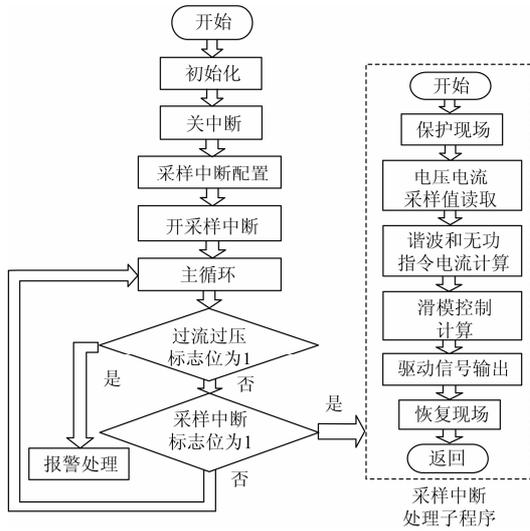


图 3 DSTATCOM 软件流程图

Fig. 3 Software flow of DSTATCOM

首先初始化变量，对采样中断进行配置，之后进入主循环。当有短路、过压现象出现时，过流过压标志位置 1，此时执行报警处理程序，闭锁驱动信号，实现主电路与电网的分离，保护 DSTATCOM 不受损坏。正常工作时，当采样周期到来时，采样中断标志位置 1，执行采样中断处理子程序，读取电压电流的采样值，计算指令电流，进行滑模控制的计算，输出驱动信号进行控制。

### 3.3 DSTATCOM 实验结果

依据以上设计，研制了一台 DSTATCOM 实验样机，负荷类型为三相桥式整流负载并联三相不对称感性负载，功率 10 kVA。采用 TDS2014 示波器捕获实验波形，如图 4 所示，波形频谱如图 5 所示。

图 4(a)为三相不对称负荷电流波形，其不对称和畸变程度较大，含有大量谐波和无功分量，为便于分析，给出 A 相电流的频谱特性如图 5(a)所示，电流总谐波畸变率(*THD*)为 26.81%，各次谐波含量较大，最大谐波为 5 次和 7 次，幅值分别为基波的 21.33%和 11.05%。图 4(b)给出了采用一般滑模控制方法的补偿效果，可见补偿后电网电流相较于补偿前有了一定的改善，但是存在较大的“毛刺”现象，补偿后 A 相电流频谱特性如图 5(b)所示，*THD* 为 6.38%，谐波含量得到降低，含量最大的 5 次和 7 次谐波分别为基波幅值的 3.14%和 2.15%。而图 4(c)采用新型滑模控制方法补偿后的电网电流波形更加光滑，近似于正弦波，“毛刺”现象得到了很大改善，其频谱如图 5(c)所示，*THD* 为 4.17%，各次谐波含

量得到进一步降低，5 次和 7 次谐波仅为基波幅值的 2.35%和 1.59%。通过比较可以看出，新型滑模控制方法比一般滑模控制方法可以更好地对负荷电流进行补偿，补偿后的电网电流波形更加光滑，*THD* 更小，“抖振”现象得到明显削弱。实验结果证明了该方法的正确性和可行性。

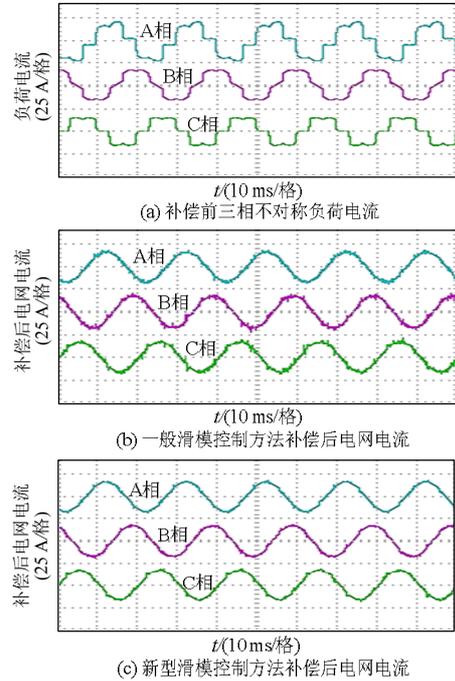


图 4 实验波形

Fig. 4 Experimental waveforms

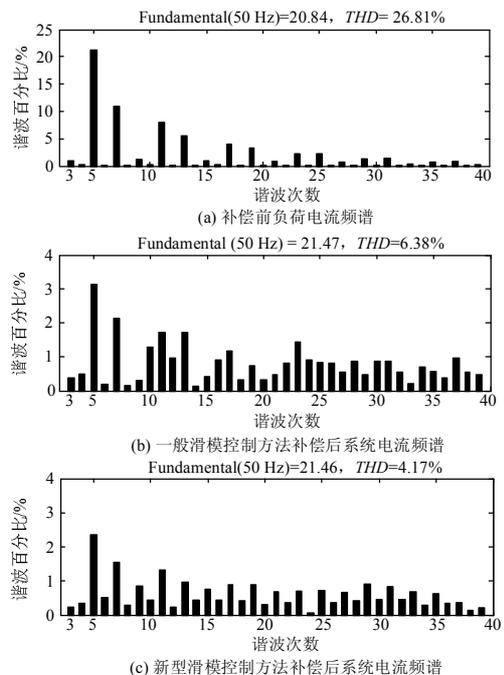


图 5 电流频谱(A 相)

Fig. 5 Frequency spectrum of A-phase current

## 4 结论

1) 本文对滑模控制进行了分析, 鉴于其具有响应速度快, 鲁棒性好的优点, 将其应用于 DSTATCOM 提高系统的动态响应和抗干扰性。

2) 在对三相四线型 DSTATCOM 数学模型的时域分析基础上, 根据滑模控制理论, 合理定义切换面, 得出了 DSTATCOM 滑模控制的一般控制规律, 并给出了电流完全可控的条件。

3) 针对采用一般滑模控制律时电流毛刺较大的缺点, 提出一种新型滑模控制律。该控制律将滑模面分解为两个滑模子面, 根据其偏离程度采用不同的滑模控制规律。样机实验结果表明, 该方法既保证了电流跟踪的快速性又改善了电流的毛刺现象。本文提出的滑模控制方法简单、有效, 对于提高 DSTATCOM 的滑模控制精度具有积极意义。

## 参考文献

- [1] 朱劲松, 李磊. 基于模块化多电平换流器的 STATCOM 分析与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 113-117.  
ZHU Jing-song, LI Lei. Analysis and control of STATCOM based on modular multilevel converters[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 113-117.
- [2] 薛畅, 王建赅, 纪延超, 等. 结合蓄电池储能系统的 STATCOM 的电流解耦控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 43-48.  
XUE Chang, WANG Jian-ze, JI Yan-chao, et al. Current decoupling control of STATCOM combined with battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 43-48.
- [3] 陈兴华, 朱长胜, 王海龙, 等. H 桥级联 STATCOM 的控制策略及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 119-122.  
CHEN Xing-hua, ZHU Chang-sheng, WANG Hai-long, et al. Control strategy and simulation of STATCOM based on cascaded H-bridge[J]. Power System Technology, 2009, 33(19): 119-122.
- [4] 范瑞祥, 吴素农, 孙旻. 用于变电站电能质量调控的 D-STATCOM 及其系统调试[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 149-154.  
FAN Rui-xiang, WU Su-nong, SUN Min. Distribution static synchronous compensator for power quality control in substation and its system test[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 149-154.
- [5] 刘亮, 邓名高, 欧阳红林. D-STATCOM 自适应检测算法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 115-119.  
LIU Liang, DENG Ming-gao, OUYANG Hong-lin. A research of adaptive detection algorithm for D-STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 115-119.
- [6] 许胜, 杨振宇. 一种基于电流分离补偿的级联型 DSTATCOM 及其建模与控制[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 25-33.  
XU Sheng, YANG Zhen-yu. Modeling and control of cascaded H-bridge DSTATCOM based on current separation compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 25-33.
- [7] 杨晓峰, 范文宝, 王晓鹏, 等. 基于模块组合多电平变换器的 STATCOM 及其控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 7-13.  
YANG Xiao-feng, FAN Wen-bao, WANG Xiao-peng, et al. Static synchronous compensator based on modular multilevel converter based STATCOM and its control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 7-13.
- [8] 荣飞, 罗安, 范卿. 应用于不平衡系统的 STATCOM 电压控制新方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 138-143.  
RONG Fei, LUO An, FAN Qing. A novel voltage control method applied in STATCOM under unbalanced system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 138-143.
- [9] 张莹, 吴敬兵. 混合有源电力滤波器的复合变结构电流控制[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 113-117.  
ZHANG Ying, WU Jing-bing. Complex variable structure current control for hybrid active power filters[J].

- Power System Technology, 2011, 35(6): 113-117.
- [10] 单翀, 王奔, 陈丹, 等. 基于滑模控制理论的 STATCOM 无功补偿控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 150-154.
- SHAN Chong-hao, WANG Ben, CHEN Dan, et al. Study of the reactive compensation of STATCOM based on the sliding mode control theory[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 150-154.
- [11] 胡志坤, 张乾, 刘守明, 等. 三相并联型有源滤波器的滑模控制方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 122-128.
- HU Zhi-kun, ZHANG Qian, LIU Shou-ming, et al. Sliding mode control method of three phase shunt active power filter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 122-128.
- [12] 江道灼, 张振华. 三相 H 桥级联静止同步补偿器的控制策略[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 2024-2031.
- JIANG Dao-zhuo, ZHANG Zhen-hua. Control scheme of three-phase H-bridge cascaded STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 2024-2031.
- [13] GONZALEZ T, MORENO J A, FRIDMAN L. Variable gain super-twisting sliding mode control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2012, 57(8): 2100-2105.
- [14] LEVANT, ARIE. Chattering analysis[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(6): 1380-1389.
- [15] 周华伟, 温旭辉, 赵峰, 等. 一种新颖的电压源逆变器自适应死区补偿策略[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 26-32.
- ZHOU Hua-wei, WEN Xu-hui, ZHAO Feng, et al. A novel adaptive dead-time compensation strategy for VSI[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(24): 26-32.
- [16] SEON H H, JANG M K. Dead time compensation method for voltage-fed PWM inverter[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(1): 1-10.
- 
- 收稿日期: 2013-09-28; 修回日期: 2013-11-19
- 作者简介:
- 张伟奎(1976-), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化、电力系统运行与控制; E-mail: hywanghd@163.com
- 常鲜戎(1956-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析与控制;
- 李涛(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制。